

国际海底观测网络的发展及现状

李德威^{1,2}, 丁忠军¹, 景春雷¹, 史先鹏¹, 杨雷¹, 李宝钢¹

(1. 国家深海基地管理中心 青岛 266237; 2. 哈尔滨工程大学船舶工程学院 哈尔滨 150001)

摘要:海底观测网络是推动海洋科学技术发展,了解地球环境系统的重要基础,也是帮助人类了解海洋从而促进全球经济发展的重要方法。文章回顾了各国在海底观测系统发展过程中的研究计划和建设情况;介绍了当前各国海底观测网络及其投入业务应用后,在多学科综合观测、多网络交互融合、数据交换利用以及海洋科学应用等方面的发展方向,对我国海底观测探测网络建设,深海新型传感器发展,海底观测网标准化体系完善等方向进行了分析展望。

关键词:海底观测网;观测系统;深海大洋;海洋科学技术发展;地球环境系统

中图分类号:P71

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2020)11-0013-06

Present Status and Development of International Seafloor Observatory Network

LI Dewei^{1,2}, DING Zhongjun¹, JING Chunlei¹, SHI Xianpeng¹, YANG Lei¹, LI Baogang¹

(1. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China; 2. Harbin Engineering University Shipbuilding Engineering College, Harbin 150001, China)

Abstract: Seafloor Observatory Network is an important basis for promoting the development of marine science and technology and understanding the earth's environmental system. It is also an important method to help people understand the ocean and thus promote global economic development. In this paper, the development process of Seafloor Observatory Network research plans and construct situations in various countries were reviewed, the currently development and its operational applications in multi-disciplinary comprehensive observation, multi-network interaction and integration, data exchange and utilization, marine science research were also introduced in detail. Finally, the development of China's Seafloor Observatory Networks in making use of the technical advantages of deep-sea submersibles, developing new deep-sea sensors, and improving the standardization systems were analyzed and prospected.

Key words: Seafloor Observatory Network, Observation system, Deep ocean, Marine science and technology development, Earth environment system

收稿日期:2020-03-24;修订日期:2020-10-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC1401300);山东省重点研发计划项目(2017GHY15129);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0302600)。

作者简介:李德威,工程师,硕士,研究方向为水下运载器与装备开发应用

海洋覆盖地球表面积 70.8% 的区域,对地球环境有着非常广泛的影响^[1-2],了解海洋及其内部的物理、生物、化学和地质系统是人类研究、探索海洋,开发和利用海底资源并最终认知地球、预测地球发展的重要基础,同时也是全球经济越来越依靠海洋的必然选择^[3-4]。

海底观测系统作为探索和研究海洋的最重要手段之一,通过对海洋乃至海底的动力参数、构造参数和温盐深、溶解氧等物理、化学和生物量一系列观测,为研究高纬度深海对流、海底地震、热液口地区的热液活动和生物量变化等多种多样的、相互关联的过程提供新的机会。同时,也在海底生物资源、矿产资源勘探和记录人类活动给海洋带来的影响等方面有着不可替代的作用。

1 海底观测系统在科学中的应用

了解海洋和地球需要在变化发生时记录和调查整个过程,海底观测站的出现为某个位置长时间序列多种可变参数的采集提供了可能,而这种长期的、多学科的数据集为改变传统方法,给研究地球物理、物理海洋和海洋生物等科学问题带来了极大的推动力^[5-7]。如:地球结构和大洋岩石圈动力学、海岸动力学和生态系统、紊流混合和生物物理的相互作用、海洋地壳的流体和生命、海洋、气候和生物地球化学循环等。

2 海底观测网络的发展历程

从 1960 年安装用于核爆炸和定位的地震观测站开始,伴随着海洋对板块构造起关键作用这一理论被现代海洋学广泛的接受,以及 1970 年开始的微电子和计算机科学的发展,地震学逐渐成为地球物理学的一个重要分支。也是从那时开始,通过建立海底观测站、观测链和观测网,世界上各个国家开始海洋地球科学的探测和研究。几十年来,海底观测这一方式已经被应用于除地震监测之外的热液现象、海啸预报、海洋环境变化、全球气候、地球动力学等科学研究和监测。

2.1 美国

美国国家科学基金会(NSF)在过去几十年里资助了许多利用新型接驳技术和光纤电缆通信协议的试验性小型海底观测站,并且通过这些观测站发

展了海底观测网络的相关技术。

1996 年,长期环境观测站(LEO-15)率先推出海底接驳盒的概念,主要目标是通过发展实时能力用于近海的快速环境评估和物理学/生物学预测^[8]。随后相继建设了:蒙特利湾海底地震试验网 MOISE,通过在圣安地列斯断层西侧安装和布放地球物理学和海洋学的仪器设备来推进全球海底观测系统的发展^[9];夏威夷海底火山观测网 HUGO,是世界上第一个海底火山观测网络,主要用于监测地震、火山喷发和其他海底地质活动;夏威夷-2 观测站(H2O),是世界上第一个海底地震观测网络系统;NeMO,该观测链位于距离美国俄勒冈州海岸 402 km,海面下方 1 520 m 处的 Axial 火山,并且将成为“海王星”海底观测网的一部分;马萨葡萄园岛海岸带观测网 MVCO 是在马撒葡萄园岛南岸建造的用于监测沿岸大气和海洋状况的沿岸观测系统;蒙特利海底宽带观测站(MOBB)通过持续遥测连接到岸台,使 MOBB 成为伯克利数字地震网络(BDSN)的一部分,促成北加州实时地震监测系统的实现。以上观测系统的建设为海底观测计划(OOI)的提出和实施奠定了重要的基础。

2.2 日本

日本从 1970 年开始进行基于海底电缆的地震监测,1996 年地震研究推进总部建议在 5 个海域安装基于海底电缆的地震观测系统以加强地震监测。目前为止,已经有 8 条科学海底电缆^[10],其中 2 条归日本气象厅(JMA)、2 条归东京大学地震研究学院(ERI)、1 条归地球科学和灾害预防国家研究所(NIED)、3 条归日本海洋科学技术中心(JAMSTEC)。

2003 年日本提出了新型实时海底监测网络(ARENA)方案^[11],在日本周边部署光纤电缆,并将 8 条科学海底电缆也包括在这个网络之中。ARENA 的主体结构将基于网状网络连接海底观测站和地面电台,全面运行时,系统将装备 320 个观测节点,总电缆长度达到 16 000 km。此外,日本还分别于 1997 年和 1999 年利用 2 条退役的日本—美国海底电缆 TPC-1、TPC-2 实施了 GEO-TOC 和 VENUS 项目^[12]。1996—2002 年,日本教育部、科技部、体育部和文化部创新科学基金资助的海洋半球

网络计划(OHP),通过观测站网络来研究和建立全新的地球内部结构和动力的概念^[13]。

2.3 欧洲

欧盟从 20 世纪 90 年代初期开始进行相关的可行性研究,目的在于确认发展海底观测的科学需要和技术可行性。1995 年开始,通过欧洲研究框架计划(FP 计划)资助了一系列不同规模的项目来发展海底观测系统。

地球物理学和海洋学深海研究站(GEOSTAR)项目的目的是发展和测试在真正的深海环境下用于长期(1 年)多学科综合监测的单框架海底自治观测站性能,1998 年在拉文纳东部 40 km 处 42 m 深的亚德里亚海部署了第一个示范性任务,通过 440 个小时持续运行,证实了整个系统的可靠性。2000—2001 年在第勒尼安海南部 2 000 m 深的区域完成了第一个长期深海观测任务。

中微子地中海观测站-海底网络 1(NEMO-SN1)是第一个基于 GEOSTAR 技术的地震和海洋学测量综合学科的海底观测网络,该网络是欧洲第一个实时海底网络,也是 ESONET 和 EMSO 项目中第一个运行的海底观测网络。

长期海床地质灾害监测传感器阵列(ASSEM)是为了在最大 1 km²的海床区域内长期监测岩土工程、大地测量和化学参数而发展的海底网络。2004 年节点分别布置在科林斯(Corinth)湾、佩特雷(Patras)湾和芬尼峡(Finneridfjord)湾,同时在 Patras 湾 42 m 深的地方布放了用于持续和长期测量海底边界层海水中气体浓度的气体监测模块。

海洋研究综合观测网络-地球物理学和海洋学深海研究站-3(ORION-GEOSTAR-3)是在地球物理学和海洋学深海研究站(GEOSTAR)项目成果的基础上继续发展的海底网络,在项目的支持下,GEOSTAR 海底观测站、表面浮标和水下科学移动基站都进行了升级,并且增加了能够通过声学设备与海底观测站通信的新观测点(SN3、SN4),该项目的结果是开辟了用于安全和相对节省成本管理海底观测站的新视角,以及提高在海底边界层进程认识综合方法上的可能性。

欧洲站点(EuroSITES)该网络于 2008 年 4 月

正式启动,目的是整合和增强欧洲附近 9 个已有的进行多学科研究及物理、生物地球化学和地质各种变量原位观测的深海观测站。该网络是海洋站点(oceanSITES)深海观测站国际网络欧洲组成部分,并最终为全球综合地球观测系统(GEOSS)提供原位实时的数据。

3 海底观测网络的最近进展

进入 21 世纪以来,随着无人遥控潜水器(ROV)、无人无缆潜水器(AUV)、通信、能源和传感器等技术的快速发展,海底观测系统已经成为国际海洋领域的又一个研究热点,各海洋强国争先制定、调整海洋发展战略计划和科技政策,在政策、研发和投入等方面给予强力支持,以确保在新一轮海洋竞争中占据先机^[14]。

3.1 加拿大海底科学观测网

加拿大海底科学观测网(Ocean Networks Canada, ONC)是 2007 年由维多利亚大学创建的用于发展、运行和管理世界领先的“海王星”海底观测网(NEPTUNE)与维多利亚海底实验网(VENUS)的非营利组织,这些观测站收集了长期的生物、化学、地质和物理海洋数据以支持复杂的海洋和地球进程的研究,并将这些研究成果应用在地震和海啸、海洋污染、资源开发和海洋管理等方面。

目前,加拿大海底科学观测网由 2 个区域性、4 个社区性以及 7 个传统岸基观测站组成。超过 850 km 的海底主干电缆支持这些观测站,包括 750 个仪器平台,7 个移动平台,400 套仪器,5 000 余个传感器,在一年当中持续地收集、存档和分发大量的数据。

“海王星”海底观测网是全球第一个区域性光缆连接的洋底观测试验系统^[15],铺设在胡安·德富卡洋脊到不列颠哥伦比亚海岸带的板块区域。“海王星”海底观测网于 2009 年完成设备安装,并于同年 12 月底开始正式运转。它主要包括 6 个节点,每个节点各有特征,研究范围包括:陆海相互作用、物理和近岸物理海洋学、海洋生物地球化学、沉积动力学、海底地震、海洋动物和生物多样性等。其中:Folger Passage 节点位于 Barkley sound 大陆架,深度 17~100 m,主要研究目标为沿岸地区的物理海洋学、浮游植物、浮游动物和鱼类、海洋哺乳动物;

Barkley Canyon 节点位于 shelf/slope break 海底峡谷,深度 400~653 m,主要研究目标为天然气水合物及相关的生态系统、沉积物的沉淀和运动,以及它们对鱼类和海洋生态系统的影响;Middle Valley 节点位于胡安·德富卡洋脊北部深 2 400 m 的地震活跃区域,主要研究板块构造、深海热液口生态系统、海洋/气候动态、气候变化影响;Endeavour 节点位于 2 300 m 的大洋中脊,主要研究深海生态系统、热液口系统和板块构造、地震与火山运动。

维多利亚海底实验网是世界上首个运行的可实时监测的海岸带海底光纤观测网,通过互联网、电缆网络和仪器能够提供实时海底生物、海洋和地址数据^[16-17]。整个系统包括 6 个仪器平台、3 个中心节点、3 个东部节点等,支持水流和海洋混合、鱼类和海洋哺乳动物等研究。

3.2 海底观测计划

海底观测计划(Ocean Observatories Initiative, OOI)是一套由科学驱动平台和传感器系统组成的用于观察和测量海面到海底的生物、化学、地质、物理海洋等信息的海洋研究集成观测网。该网络作为海洋研究交互观测网络(ORION)计划的一部分,是为了提供一种拥有全新的、持续的、交互式海洋科学观察能力的整体物理气象平台^[18]。近岸/全球网络节点(CGSN)和区域网络节点(RSN)是组成该系统的主要成员^[19],海底观测信息基础设施是组成 OOI 的另一个重要成员,它主要负责将近岸/全球网络节点和区域网络节点观测到的结果整合为一体,并深入数据进行验证、服务、研究等。

近岸/全球网络节点中全球网(Global Scale Nodes,GSN)的 4 个节点分别为位于阿拉斯加海湾的 Station Papa 节点、丹麦格陵兰岛南部的 Irminger Sea 节点、智利南部的 Southern Ocean 节点以及阿根廷的 Argentine Basin 节点。而近岸网(Coastal Scale Nodes,CSN)主要由位于美国东部的太平洋海湾处 Pioneer Array 节点和美国西部俄勒冈州新港的 Endurance Array 节点组成。在整个 OOI 计划中,现在已经开始建设的是主要用于海洋地震观测的区域网络节点(RSN)系统,在东北太平洋铺设 1 000 km 左右的海底电缆,包括 7 个海底观

测主节点和“海王星”海底观测网一起构成对 Juan De Fuca 版块的整体观测,该系统 2011—2012 年开展电缆铺设,2013 年开始联调测试,目前,该系统可为 7 个主要的科学节点提供高达 200 kW 功率,240 Gbps 的 TCP/IP 网络通信能力。

3.3 美国蒙特雷湾加速研究系统项目

美国蒙特雷湾加速研究系统(Monterey Accelerated Research System,MARS)项目开始于 2002 年,主要目的:① 提供方便的深海设施,研究人员可以测试仪器和设备,而这些设备将有可能成为美国海底观测计划(OOI)的一部分;② 为研究者提供可能用于世界上其他节点海洋观测设备的测试;③ MARS 为研究者提供实验和收集 MARS 附近海洋环境独有的物理、生物、地质和化学数据的机会。

MARS 的特点是可通过遥控技术对安装在该深海观测平台上的各种海洋仪器进行控制,系统单个海底节点布放在 891 m 深的海底,光电混合传输电缆总长 52 km,传输速度为 100 Mbits/s,海底的仪器舱大小 1.2 m×4.6 m,可提供实时观测,并且由 ROV 完成安装和维护维修。

3.4 地震和海啸海底观测密集网络

作为海洋半台网计划(OHP)的延续,地震和海啸海底观测密集网络(Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis,DONET)是日本国立海洋研究开发机构(JAMSTEC)为主要参加单位且最具有代表性的海底观测网络计划。项目 2011 年完成建设,在日本南海海槽的 To-Nankai 地区设置,目的是建立海底大尺度实时研究和监测地震、海底地形和海啸的基础设施。从 2010 年开始,日本启动了 DONET2 的建设,目的是监测初始网络西部更大范围的区域。目前,该观测站拥有 450 km 的主干缆线,2 个陆基站,7 个科学节点以及 29 个监测站,并且增加 2 个监测站和 2 个钻探监测站与 DONET1 连接。

3.5 欧洲海洋观测网

欧洲海洋观测网(European Sea Observatory NETwork,ESONET)计划提议开始于 2007 年 3 月,其前身是欧洲海洋观测网第一阶段(ESONET CA)和欧洲海洋观测网实施模型(ESONIM),2007 年

6 月欧洲海洋观测网卓越网络计划(ESONET NOE)启动,通过铺设大约 5 000 km 的海底缆线及相关观测设备,围绕欧洲从大陆架到深渊,形成覆盖 300 万 km^2 海底地形的监测,系统通过海底终端接线盒将观测站与陆地连接起来并利用电缆 IP 协议为观测仪器提供能源、实现双向实时数据遥感勘测从而进行全球变化、自然灾害警报等信息的传送和欧洲海域的基本管理^[20-22]。

欧洲多学科海底观测计划(European Multi-disciplinary Seafloor Observation, EMSO)是欧洲用于长期监测生态系统、气候变化和地质灾害等环境过程海底观测站的大型基础设施^[23],其观测范围从北冰洋延至黑海,目前共有 11 个深海节点,4 个浅水节点。EMSO 的节点安装了大量的传感器用于探测盐度、温度、海流方向与密度、海床运动等参数,部分节点与岸基连接,部分通过卫星自动传输。该研究基础设施将利用科学界和工业的协同优势,推动海洋技术的重大进步,提升欧洲在海洋科学和技术方面的发展战略及竞争力,增强欧洲海洋观测网(ESONET)观测数据的可获得性,并且成为全球环境和安全监测(GMES)及全球综合地球观测系统(GEOSS)的重要组成部分^[24]。

3.6 其他观测站

3.6.1 ACO

Aloha 观测系统(Aloha Cabled Observatory, ACO)于 2011 年部署在夏威夷瓦胡岛北约 100 km 的 ALOHA 站上,是世界上最深的海底观测站(4 728 m),也是夏威夷长时间序列观测项目(HOT)的重要节点之一。该观测站由 5 个海底模块连接而成,包括接线盒、观测站模块、三脚架相机、底部节点和 1 个系泊,该站位的传感器能提供视频和压力、盐度、声速、温度等信息。

3.6.2 澳大利亚集成海洋观测系统

集成海洋观测系统(Integrated Marine Observing System, IMOS)是澳大利亚建设的用于近岸生物和物理海洋参数长期监测的国家观测网络,目前共有 7 个国家参考站(NRS),每个站点都安装有原位系泊传感器,用于营养盐、微生物、浮游植物、小型浮游动物等环境变量参数的采集。同时,声学监听站

可提供海洋环境噪声、水下事件、鱼类和哺乳动物、海洋生产等声音的监测。

4 我国海底观测网络的发展展望

近 10 余年来,我国建设了一批具有代表性的海底观测网络或试验平台。其中:2009 年同济大学完成中国第一套海底观测组网技术系统验收^[25],该试验站由海洋登陆平台及控制传输模块,以及 1.1 km 的海底光电复合缆及多种外接仪器等组成;2016 年“南海深海海底观测网试验系统”建成投入使用,该试验系统通过 150 km 海底主干缆线在海底 1 800 m 深处安装了多套海洋化学、地球物理和海底动力观测的平台与传感器,用于海洋科学长期测量与监测。

经过 50 余年的发展,海底观测技术已经由单一的观测站发展到可以覆盖区域性海域的观测网络,主要研究目标也由最初的地震检测发展到对多学科科学研究及全球气候、海洋灾害监测与预警。随着各国在资金投入和关注程度上的增长,越来越多的新技术应用于海底观测网络,为多学科间数据的采集和各种边缘学科的发展、研究创造了很好的条件。随着国际间合作的加强,各国的海底观测网络已经不再是独立的系统,而成为各种全球观测计划的子系统或一部分。充分借鉴国际各国海底观测网络系统建设和运行经验,未来我国在海底观测网络系统建设过程中应加强如下几方面。

(1)跟踪国际海洋观测先进技术,自主创新发展用于深海环境的新型传感器技术,具备功耗低、稳定性高、接口化等特点,并继续优化和完善海底接驳、水下湿插拔等关键技术。

(2)在海底固定式观测平台/网络基础上,充分发挥无人遥控潜水器(ROV)、无人无缆潜水器(AUV)、载人潜水器(HOV)等水下运载器在平台建设、精细化定点作业、数据传输等方面的优势,加强其在海底观测网络建设与应用中的信息与技术融合,实现持续稳定的大尺度、长时间的序列观察。

(3)建设和完善海洋观测规章制度与标准规范,建立海底观测网标准化体系,为今后更多新传感器、新观测装备投入使用,以及实现规范化的研制应用提供技术准则,推动更多装置与国际海底观测网实现互联互通。

参考文献

- [1] NRC. Decade-to-Century-Scale Climate Variability and Change [M]. National Academy Press, Washington DC, 1996: 160.
- [2] NRC. Global Ocean Science: Toward an Integrated Approach [M]. National Academy Press, Washington DC, 1999: 184.
- [3] FAVALI P, BERANZOLI L. Seafloor Observatory Science: A Review[J]. Annals of geophysics= Annali di geofisica, 2009, 49(2).
- [4] BARTON E D. Oceanography: An illustrated guide[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 1997, 217(1): 142—143.
- [5] FAVALI P, SMRIGLIO G, BERANZOLI L, et al. Towards a permanent deep sea observatory: The GEOSTAR European experiment[C]// Science-Technology Synergy for Research in the Marine Environment: Challenges for the XXI Century. 2002: 111—120.
- [6] MILLOT, C. Deep physical oceanography, experimentation and benefits from bottom observatories [M]. Science-Technology Synergy for Research in the Marine Environment: Challenges for the XXI Century, 2002: 12, 19—26.
- [7] THIEL H, KIRSTEIN K O, LUTH C, et al. Scientific requirements for an abyssal benthic laboratory[J]. Journal of Marine Systems, 1994, 4(6): 421—439.
- [8] ALT C J V, GRASSLE J F. Leo-15 An Unmanned Long Term Environmental Observatory[C]// OCEANS. IEEE, 1992, 2: 849—854.
- [9] BEGNAUD M L. Constraining Continental Margin Seismicity by Extending On-Shore Seismograph Stations to Critical Off-Shore Sites [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(90): 414—424.
- [10] KAWAGUCHI H, MOMMA H, IWASE R, HIRATA K, KAIHO Y, MIKADA H. Scientific Submarine Cable Systems in JAMSTEC[C]// SubOptics2001, 2001: 184—187.
- [11] ARENA Technical White Paper. A Technical Report on the Advanced Real-time Earth Monitoring Network in the Area [EB/OL]. (2003—6—1) [2020—3—10]. <https://www.ieee-jp.org/section/tokyo/chapter/OE-22/ARENA>.
- [12] KASAHARA J, IWASE R, NAKATSUKA T, et al. An experimental multidisciplinary observatory (VENUS) at the Ryukyu Trench using the Guam-Okinawa Geophysical Submarine Cable[J]. Annals of Geophysics, 2006, 49: 595—606.
- [13] KIYOSHI, SUYEHIO, EIICHIRO, et al. Deep sea borehole observatories ready and capturing seismic waves in the western Pacific[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2013, 83(53): 621—625.
- [14] 李三忠, 金宠, 戴黎明, 等. 洋底动力学: 国际海底相关观测网络与探测系统的进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 029(005): 131—143.
- [15] DELANEY J, HEATH G R, CHAVE A, et al. NEPTUNE: real-time, long-term ocean and Earth studies at the scale of a tectonic plate[C]// MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 01CH37295). IEEE, 2002: 1366—1373.
- [16] DEWEY R, TUNNICLIFFE V. VENUS: future science on a coastal mid-depth observatory[C]// 2003 International Conference Physics and Control. Proceedings (Cat. No. 03EX708). IEEE, 2003: 232—233.
- [17] DEWEY R, ROUND A, MACOUN P, et al. The VENUS Cabled Observatory: Engineering Meets Science on the Seafloor [C]// Oceans. IEEE, 2007: 1—7.
- [18] Consortium for Ocean Leadership. OOI PROJECT EXECUTION PLAN, Document Control Number 1001—00000 [EB/OL]. (2013—10—28) [2020—03—10]. http://oceanobservatories.org/wp-content/uploads/2017/04/1001—00000_PEP_OOI.pdf.
- [19] Consortium for Ocean Leadership. OOI FINAL NETWORK DESIGN, Document Control Number 1101—00000 [EB/OL]. (2010—04—22) [2020—03—10]. http://oceanleadership.org/wp-content/uploads/2009/02/1101—00000_FND_OOI_ver_2—06_Pub.pdf.
- [20] PRIEDE I G, SOLAN M, MIENERT J, et al. ESONET—European sea floor observatory network[C]// Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No. 04CH37600). IEEE, 2003(4): 2155—2163.
- [21] PERSON R, BERANZOLI L, BERNDT C, et al. ESONET: An European Sea Observatory Initiative [C]// OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno—Ocean. IEEE, 2008: 1—6.
- [22] PULLAT I, PERSON R, LEVEQUE C, et al. Standardization prospective in ESONET NoE and a possible implementation on the ANTARES Site[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2009, 602(1): 240—245.
- [23] FAVALI P, BERANZOLI L, ROLIN J F, et al. EMSO: European multidisciplinary seafloor observatory[C]// IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. IEEE, 2011(602): 21—27.
- [24] CRAGLIA M, GOODCHILD M, ANNONI A, et al. Next-Generation Digital Earth: A position paper from the Vespucci Initiative for the Advancement of Geographic Information Science [C]// 2008 International Journal of Spatial Data Infrastructures Research, 2008, 3(3): 146—167.
- [25] 盛景荃. 上海建成中国第一套海底观测组网技术系统[J]. 华东科技, 2009(7): 42—42.